

**Secagem de feijão carioca em secador rotativo****Carioca bean drying in rotating dryer**

Recebimento dos originais: 10/01/2019

Aceitação para publicação: 12/02/2019

**William Borges Dias**

Engenheiro Químico pela Universidade de Uberaba  
Gerente de Projetos da Araxá Metais e Resíduos Industriais Ltda  
Av. José Ananias de Aguiar, 130, Araxá – MG, Brasil  
E-mail: [bwill.gt@gmail.com](mailto:bwill.gt@gmail.com)

**José Roberto Delalibera Finzer**

Doutor em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas  
Universidade de Uberaba  
Av. Nenê Sabino, 1801 - Bairro Universitário, Uberaba – MG, Brasil  
E-mail: [jrdfinzer@pq.cnpq.br](mailto:jrdfinzer@pq.cnpq.br)

**RESUMO**

O crescimento populacional paralelo à ascensão do consumo per capita do feijão tem contribuído para a diminuição do produto no mercado, causando a restrição desta leguminosa na dieta alimentar de famílias de baixa renda. O feijão comum (*Phaseolus Vulgaris*) é importante por ser uma fonte pouco onerosa de proteínas, fibras, carboidratos e minerais como ferro, cálcio, magnésio e zinco. A eficiência nos processos agrícolas é de extrema relevância para o aumento da produtividade e diminuição de desperdícios. A secagem é uma etapa crítica no processo de obtenção do feijão podendo ser realizada de forma natural ou artificial. Na secagem artificial, a interferência de fatores climáticos é minimizada e uma melhor qualidade é alcançada. Uma opção é utilizar secadores rotativos com distribuição radial do ar em escoamento operando em batelada. Este equipamento é constituído por um cilindro tubular disposto no sentido horizontal e no seu interior alimenta-se o ar de secagem através de uma câmara de distribuição. O presente trabalho teve o objetivo de analisar tecnicamente a utilização de um secador rotativo de aquecimento indireto paralelamente ao estudo laboratorial em estufa na secagem de feijão carioca. Na etapa laboratorial fez-se um estudo do encolhimento do grão considerando-o um esferoide tri-axial oblato. Para a análise do processo no secador rotativo foram elaboradas curvas de secagem do feijão. Utilizaram-se os resultados dos cálculos do balanço de massa e energia para obtenção de uma equação empírica para determinar o coeficiente de transferência de calor,  $U_a$ . Os resultados indicaram um padrão de diminuição volumétrica contínuo nos grãos que cessa a 9,58% (bu). Foi identificado um período de indução indicando que a temperatura da massa de grão não se comporta de forma homogênea no início da secagem com o secador rotativo. Concluiu-se que a redução da umidade da massa de 11.000 quilos de feijão carioca de 18,2 para 15,3% bu com duração de 5 horas e 23 minutos pôde ser realizada com aplicação de 57 kW de potência, parâmetro obtido por cálculos de balanço de energia.

**Palavras-chave:** Secagem de feijão, Secador rotativo, Energia na secagem.

**ABSTRACT**

Population growth parallel to the rise in per capita consumption of beans has contributed to the decrease of the product in the market, causing the restriction of this legume in the diet of low income families. Common bean (*Phaseolus vulgaris*) is important because it is an inexpensive

source of protein, fiber, carbohydrates and minerals like iron, calcium, magnesium and zinc. Efficiency in agricultural processes is of extreme relevance for increasing productivity and reducing waste. Drying is a critical step in the process of obtaining the beans, which can be done naturally or artificially. In artificial drying, the interference of climatic factors is minimized and better quality is achieved. One option is to use rotary dryers with radial distribution of run-off air operating in batch mode. This equipment is constituted by a tubular cylinder disposed in the horizontal direction and inside it the drying air is fed through a distribution chamber. The present work had the objective of analyzing technically the use of a rotary dryer of indirect heating parallel to the laboratorial study in a drying oven of carioca bean. In the laboratory stage a study of grain shrinkage was made considering a tri-axial oblate spheroid. For the analysis of the process in the rotary drier, drying curves of the bean were elaborated. The results of mass and energy balance calculations were used to obtain an empirical equation to determine the coefficient of heat transfer,  $U_a$ . The results indicated a pattern of continuous volumetric decrease in the grains which ceases to 9.58% (bu). An induction period was identified indicating that the temperature of the grain mass does not behave homogeneously at the beginning of drying with the rotary dryer. It was concluded that the moisture reduction of the mass of 11,000 kilos of carioca beans from 18.2 to 15.3% bu with duration of 5 hours and 23 minutes could be carried out with 57 kW of power, parameter obtained by calculations of energy balance.

**Keywords:** Drying of beans, Rotary drier, Energy in drying.

## 1 INTRODUÇÃO

O feijão comum (*Phaseolus Vulgaris*) é uma leguminosa importante, constituindo uma fonte pouco onerosa de proteínas, fibras, carboidratos e minerais. Dentre as variedades de leguminosas mais consumidas mundialmente, o feijão encontra-se em posição de destaque. No Brasil, o padrão arroz-feijão é amplamente consumido pela população (FERNANDES; DUTRA; PROENÇA, 2007).

A secagem de grãos é uma etapa do processo agrícola amplamente utilizada por agricultores. A secagem pode ser realizada de forma natural e que utiliza da incidência dos raios solares, condicionada a condições climáticas que podem causar o aumento do período de secagem e em consequência a deterioração do produto por microrganismos, ou artificial, processo em que utiliza secadores mecânicos (CARDOSO SOBRINHO, 2001).

A secagem do feijão deve ser realizada logo após a colheita, momento no qual o feijão se encontra a umidade inferior a 20% (base úmida). O grão com elevado teor de água propicia a atuação de microrganismos, sendo comum o feijão abrigar ovos de carunchos que ao eclodirem em armazéns podem proporcionar enormes prejuízos. A alta umidade no grão também desencadeia o processo germinativo da semente (CARVALHO, 1994). A umidade recomendada no armazenamento para o caso do feijão comum se situa em torno de 10 a 11% (bu) e cerca de 15% (bu) para armazenamento em curto prazo (FILHO, 1985).

Os secadores rotativos com distribuição radial do ar de secagem é um dos tipos muito comercializados no Brasil. Este secador foi desenvolvido inicialmente para a secagem de café, mas tem sido usado para a secagem de outros tipos de grãos. Consiste em um secador usado por

agricultores e cooperativas de produtores rurais principalmente por possibilitar elevada velocidade de secagem, flexibilidade em termos de utilização para outros grãos, fácil operabilidade e sua efetiva tendência para secagem uniforme.

A configuração básica de um secador rotativo para grãos com capacidade volumétrica de até 15 m<sup>3</sup> é mostrada nas Figuras 1 e 2.

O secador rotativo é constituído basicamente por um cilindro tubular disposto no sentido horizontal que gira em torno de seu eixo longitudinal com velocidade que varia entre 1 a 15 rpm. Uma câmara distribuidora de ar atravessa axialmente o interior do cilindro. O dispositivo tem como objetivo a distribuição homogênea do ar em escoamento e a promoção da uniformidade da secagem pelo movimento com mistura dos grãos. O produto com elevado grau de umidade é transportado por elevadores até um silo posicionado acima do secador sendo descarregado por gravidade dentro do cilindro. Necessita-se que se deixe um espaço vazio com altura entre 0,2 e 0,3 m na posição superior do cilindro rotativo para possibilitar uma melhor movimentação e mistura dos grãos durante a secagem. A secagem ocorre em batelada até que se atinja o teor de umidade desejado (COSTA 2010).

A Equação (1) consiste em uma equação empírica, que relaciona o coeficiente de transferência de calor  $U_a$  (Btu/ft<sup>3</sup>.h.°F) para secadores rotativos, (McCABE et al., 1993):

$$U_a = 0,5 \frac{G^n}{D} \quad (1)$$

sendo:  $U_a$  expresso em Btu/ft<sup>3</sup>.h.°F,  $G$  é o fluxo mássico do gás em lb/ft<sup>2</sup>.h e  $D$  é o diâmetro do secador em *feet*, “ $n$ ” depende do tipo de secador rotativo. Aplicando a equação:

$$\dot{q} = 0,5 \frac{G^n}{D} V \Delta \bar{T} = 0,125 \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot G^n \cdot \Delta \bar{T} \quad (2)$$

Sendo:  $V$  o volume do secador (ft<sup>3</sup>);  $L$  o comprimento (ft);  $\Delta \bar{T}$  a média logarítmica de temperatura entre a o ar de secagem na entrada e saída e a temperatura de bulbo úmido (°F).

O objetivo deste trabalho foi realizar balanço de massa e energia em um secador rotativo usado para a secagem de feijão carioca, utilizando modelos de predição das propriedades termofísicas usando a composição química desta leguminosa e quantificar o desempenho do secador, culminando com a obtenção de coeficiente volumétrico de transferência de calor.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos de secagem foram efetuados com: 1) estufa com circulação forçada de ar; 2) secador rotativo comercial (PINHALENSE) com capacidade volumétrica de 15 m<sup>3</sup> operando em sistema batelada, realizado na empresa Feijão João Pedro LTDA, localizada no município de Araxá (MG) - Brasil.

O material processado foi feijão carioca (*Phaseolus Vulgaris*), umidade inicial na colheita de 18,2% (bu), produzido no município de Araxá, Minas Gerais, no mês de março de 2013.

Os parâmetros quantificados durante a secagem foram: os teores de umidade dos grãos; a vazão volumétrica e a temperatura do ar de secagem (entrada 80°C; exaustão: média de 36,8°C); temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar ambiente.

O secador rotativo (ver a Figura 2) consiste em um cilindro de 2,25 m de diâmetro por 5 m de comprimento constituído por chapa de aço perfurada. O cilindro gira em torno de seu eixo longitudinal com velocidade de 3 rpm, por meio de um conjunto de engrenagens, acionado por um motor elétrico de 5 hp. O ar de secagem é admitido por um soprador centrífugo instalado em uma das extremidades do cilindro e escoar no interior da massa de grãos.

O aquecimento do ar de secagem é realizado em trocador de calor tubular, com gases de combustão de fornalha onde se queima madeira de reflorestamento. O cilindro do secador foi carregado com o feijão carioca proveniente da lavoura por meio de elevadores conectados com um silo de espera e após a secagem foi descarregado por gravidade em câmaras de estocagem.

A umidade relativa do ar ambiente no local do experimento foi monitorada com o uso de um psicrômetro. A vazão volumétrica do ar de entrada do secador foi calculada pelo produto da velocidade média de admissão do ar pela área da seção de entrada.

O acompanhamento da umidade dos grãos na secagem com o uso do secador rotativo comercial foi realizado por aparelho GEHAKA G650.

No estudo laboratorial, a umidade do feijão foi medida pelo método da estufa, com circulação forçada de ar na temperatura 105 ± 2 °C, até massa constante, usando amostras de 15 grãos do feijão em estudo, em triplicata. Uma das amostras teve a massa quantificada a cada 30 minutos. Outras cinco amostras, cada constituída por um único grão de feijão, foram colocadas na estufa e tiveram suas massas e volumes monitorados para estudo do encolhimento.

O volume de grãos de feijão marcados foi determinado pela medição dos três eixos ortogonais com o uso de um paquímetro digital, e usando a Equação (3), considerando o grão um esferoide tri-axial oblato, Figura 3. Foi efetuado estudo de encolhimento usando o Modelo de Secagem Uniforme (Equação 4).

$$V = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot c}{6} \quad (3)$$

$$\frac{A}{A_0} = (bX + C)^{2/3} \quad (4)$$

Sendo:  $b = \rho_o / (X_o + 1)$  e  $C = 1 + b - \rho_o$ ;  $\rho_o$  e  $X_o$  são a densidade e umidade inicial do feijão.

As propriedades termofísicas do feijão, densidade e calor específico, foram quantificadas usando correlações em função da porcentagem de proteínas, carboidratos, lipídios, cinzas e água do feijão (HELDMAN, 2002). Para o feijão carioca, o percentual de proteínas é 18,51%, carboidratos 76,75%, lipídios 1,29% e cinzas em 3,45% Pires et al. (2005).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A quantificação da velocidade de admissão do ar no secador foi efetuada medindo-se a velocidade do ar em diversos pontos na seção transversal retangular (0,75 por 0,92 m) de alimentação do ar no trocador de calor do secador e os resultados (m/s) foram ajustados à Equação (5) seguindo a integração para cálculo da velocidade média (BIRD, STEWART e LIGHTFOOT, 2002), obtendo-se a vazão do ar aquecido admitido no secador em 3,35 m<sup>3</sup>/s.

$$v = 4,86 + 0,1739x + 2,8533y \quad (5)$$

$$v_{\text{médio}} = \frac{\int_{-0,46}^{+0,46} \int_{-0,375}^{+0,375} (v) \, dx \, dy}{\int_{-0,46}^{+0,46} \int_{-0,375}^{+0,375} dx \, dy} = \frac{\int_{-0,46}^{+0,46} \int_{-0,375}^{+0,375} (4,86 + 0,1739x + 2,8533y) \, dx \, dy}{2 \cdot 0,375 \cdot 0,46} = 0,46 \, \text{m/s}$$

A umidade inicial do feijão foi 18,3 (base úmida); 0,224 (bs).

A Figura 4 consiste na curva de encolhimento de uma amostra de feijão, o resultado de 5 amostras mostrou que, em média, para umidade de 0,1 kg<sub>água</sub>/kg<sub>fs</sub>, praticamente, cessa o encolhimento e os pontos experimentais se afastam do modelo. Essa condição não foi alcançada na secagem em secador rotativo, pois a umidade de descarga foi 0,18 kg<sub>água</sub>/kg<sub>fs</sub>.

A Figura 5 mostra as curvas de secagem e de taxa de secagem do feijão. Pode-se verificar que, no início da secagem, os grãos mais à periferia do secador rotativo tem um aumento no teor de água causado pela passagem do ar saturado com vapor de água proveniente dos grãos mais ao centro do secador, caracterizando o período de indução. Em um primeiro momento, o sólido está a uma temperatura abaixo da temperatura de saturação adiabática do ar e a taxa de evaporação aumenta até o momento em que é atingida a condição de taxa constante. O período à taxa constante no caso estudado abrange o decréscimo da umidade do grão do valor de 0,218 a 0,194 (bs). Já o período à taxa decrescente iniciou-se em 0,194 e ao alcançar 0,180 (bs), efetuou-se a descarga do secador dos grãos.

**4 BALANÇO DE MASSA**

Dos 11.200 kg de feijão úmido ( $0,181 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{fs}}$ ), correspondendo a 9.173 kg de feijão seco, quantifica-se que a quantidade de água retirada na operação de secagem com duração de 5,38 horas foi de 376 kg de água; 18,47% do total de água que alimentou o secador constituindo parte do feijão carioca.

**5 BALANÇO DE ENERGIA NO SECADOR**

$$\frac{q}{m_{\text{fs}}} = C_{\text{ps}} (T_{\text{sb}} - T_{\text{sa}}) + X_{\text{a}} C_{\text{pl}} (T_{\text{v}} - T_{\text{sa}}) + (X_{\text{a}} - X_{\text{b}}) \lambda + X_{\text{b}} C_{\text{pl}} (T_{\text{sb}} - T_{\text{v}}) + (X_{\text{a}} - X_{\text{b}}) C_{\text{pv}} (T_{\text{va}} - T_{\text{v}}) \quad (6)$$

sendo:  $T_{\text{sa}}$  a temperatura de alimentação;  $T_{\text{v}}$  é a temperatura de vaporização;  $T_{\text{sb}}$  a temperatura final do sólido;  $T_{\text{va}}$  é a temperatura final do vapor;  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água;  $c_{\text{ps}}$ ;  $c_{\text{pl}}$ ;  $c_{\text{pv}}$ , os calores específicos do sólido, líquido e vapor, respectivamente (McCABE et al., 1993). Usando o Sistema Internacional:

$$\frac{q}{m_{\text{fs}}} = 1,68(35,8 - 25) + 0,222 \cdot 4,18(26 - 25) + 2265(0,222 - 0,181) + 0,181 \cdot 4,18(35,8 - 26) + (0,222 - 0,181)1,86(36,8 - 26)$$

$$\frac{q}{m_{\text{fs}}} = 120,175 \text{ kJ/kg(ss)}$$

O calor total trocado é:  $q = 120,175 \text{ kJ/kg}_{\text{feijão seco}} \cdot 9173 \text{ kg}_{\text{feijão seco}} = 1.102.365 \text{ kJ}$ .

Dividindo o calor trocado pelo tempo de secagem obtém-se a potência de 57 kW.

Usando a Equação (2), com  $n=1,27$ , quantificado neste trabalho e os parâmetros obtidos das dimensões do secador e dados de operação: média logarítmica de diferença de temperaturas  $20,52^{\circ}\text{F}$ ;  $V_{\text{secador}} = 529,72 \text{ ft}^3$ ;  $G = 79,69 \text{ lb de ar/ft}^2 \cdot \text{h}$ , tem-se:

$$q_{(r)} = 0,5 \frac{G^{1,27}}{D} V \Delta \bar{T} = 0,5 \frac{79,69^{1,27}}{7,38} 529,72 \cdot 20,52 = 191.390 \text{ Btu/h} \quad (1.086.370 \text{ kJ})$$

Isto indica que o fator  $n$  é igual a 1,27, para o secador rotativo operando com escoamento do ar de secagem radialmente no leito de feijão.

**6 CONCLUSÕES**

A umidade de  $0,1 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{fs}}$  em que cessa o encolhimento dos grãos de feijão em secador rotativo não foi alcançada, pois o feijão foi seco para curto período de estocagem. No período de indução, inicialmente a umidade dos grãos situados no centro do secador se transfere para os grãos

da periferia pela ocorrência da saturação do ar de secagem. Por balanço massa verificou-se que a quantidade de água retirada na secagem com duração de 5,38 horas foi de 18,47% do total alimentado com o feijão. Para a secagem do feijão carioca com secador rotativo operando em batelada com escoamento radial do ar de secagem, obteve-se o fator  $n$  igual a 1,27 e foi de 57 kW a potência consumida no aquecimento do ar de secagem.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem: à empresa Feijão João Pedro LTDA, localizada no município de Araxá (MG) – Brasil; à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG pelo suporte dado à apresentação de versão anterior deste trabalho no CIBIA 9 (Valencia, Espanha); à Universidade de Uberaba pelo suporte disponibilizado para elaboração deste trabalho.

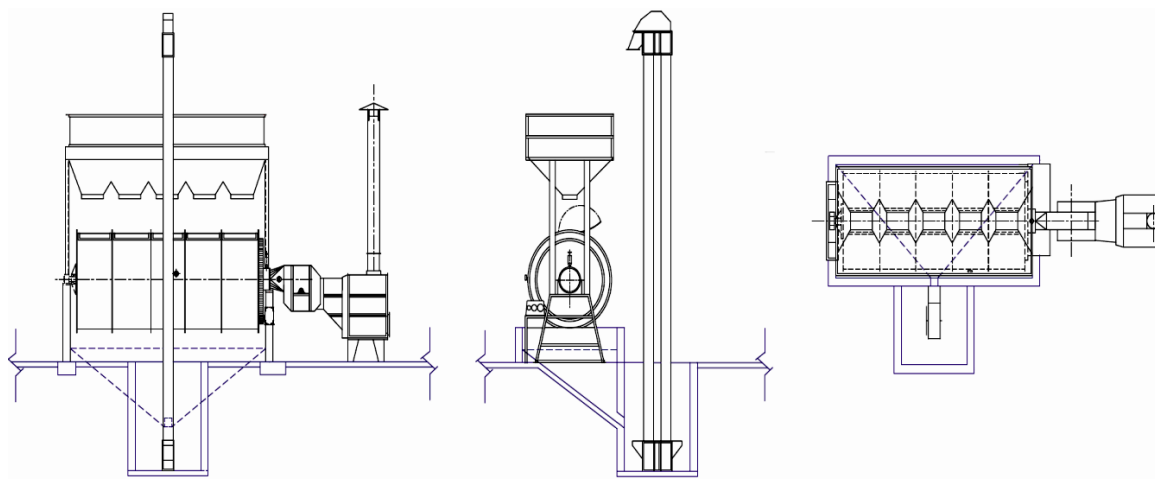


Figura 1. Configuração básica do secador rotativo.





Figura 2. Secador rotativo utilizado na secagem do feijão carioca.

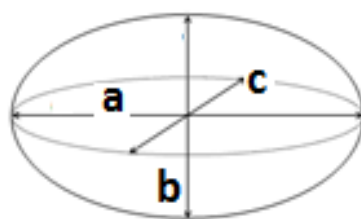


Figura 3. Dimensões características de um esferoide tri-axial oblato.

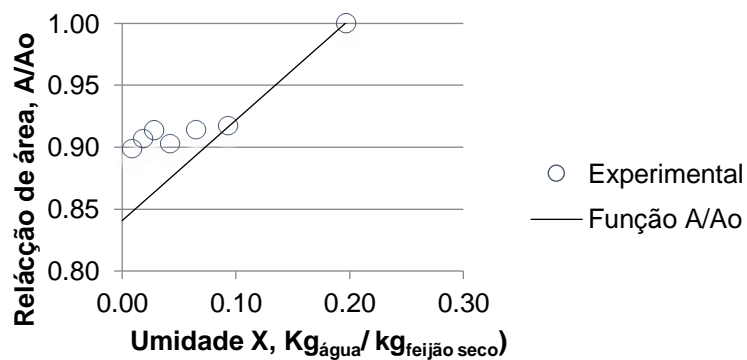


Figura 4. Relação adimensional de área em função da umidade do feijão.



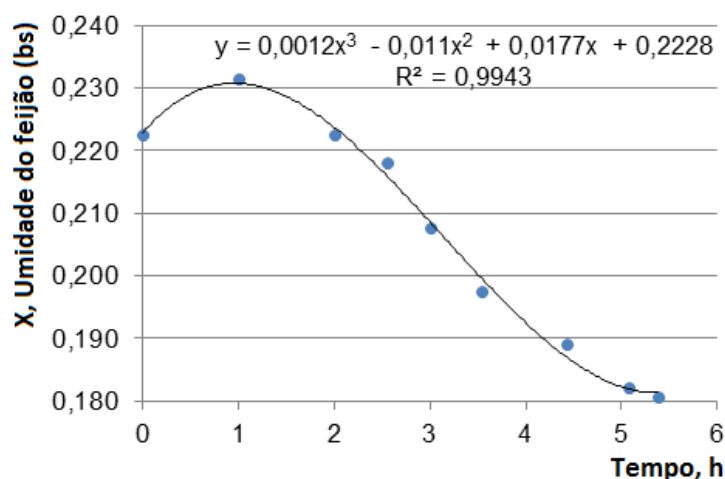


Figura 5. Curva de secagem do feijão.

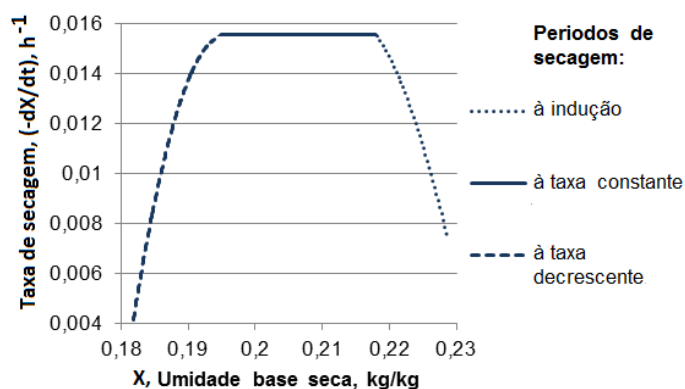


Figura 6. Curva de taxa de secagem do feijão.

## REFERÊNCIAS

- BIRD, R. BYRON; STEWART, WARREN E.; LIGHTFOOT, EDWIN N. **Transport Phenomena**. 2. ed. New York: John Wiley, 2002. 895 p.
- CARDOSO SOBRINHO, J. **Simulação e avaliação de sistemas de secagem de café**. Viçosa: UFV, 2011. 112p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- CARVALHO, N. M. **A secagem de sementes**. Jaboticabal - SP, FUNEP, 1994. 165 p.
- FILHO, V. C. **Cultura De Feijão**. Campinas - SP: Instituto Campineiro De Ensino Agrícola, 1985. 30 p.

COSTA, D. R. Análise de custo de sistemas de secagem de milho em secadores mecânicos. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa - MG, v. 18 n. 1, p. 63-76, 2010.

HELDMAN, D. R. Prediction Of Specific Heat. In: IRUDAYARAJ, Joseph; **Food Processing Operations Modeling: Design And Analysis**. New York: Marcel Dekker, 2002. cap. 1. p. 15-75.

McCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOTT. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5 ed. New York: McGraw-Hill, 1993. 1130 p.

PIRES, C.V. et al. Composição Físico-Química de Diferentes Cultivares de Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Alimentos e Nutrição**, Araraquara - SP, v. 16, n. 2, p. 157-162, 2005.